

쌍극자(Dipole-Dipole)탐사를 활용한 터널붕괴사면 조사 및 대책방안 제시 연구 Study of Stability Analysis and Countermeasure Tunnel Portal Failure using Dipole-Dipole Investigation

백용¹⁾, Yong Baek, 이종현²⁾, Jong-Hyun Rhee, 구호본³⁾, Ho-Bon, Koo, 배규진⁴⁾, Gyu-Jin Bae

¹⁾ 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원, Senior Researcher, Civil Engineering Division, KICT

²⁾ 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원, Researcher, Civil Engineering Division, KICT

³⁾ 한국건설기술연구원 토목연구부 수석연구원, Researcher Fellow, Civil Engineering Division, KICT

⁴⁾ 한국건설기술연구원 토목연구부 연구위원, Researcher Manager, Civil Engineering Division, KICT

SYNOPSIS : In case of slope failure by planted protection is constructed on the slope according to of the choice trend of a recently environmental-friendly countermeasure, there has a limitation about diagnosis and preparation of measure. Also, collapse of tunnel pithead department slope has maximum in construction and countermeasure method of construction choice unlike cut-slope. In this study, analyzed inside circumstance of slope using geophysical exploration for stability analysis and countermeasure inside presentation of tunnel pithead department slope which collapse happens. geophysical exploration used dipole(Dipole-Dipole) method that is based to distribution principle does specific resistance, goes side by side with on-the-spot observation and draws base strength parameter and executed stability analysis, and presented stabilization countermeasure inside of collapse slope on this. I wish to conduce in development and research for use technical development of geophysical exploration technique hereafter by executing geophysical exploration in road collapse spot applying through this study.

Key words : slope, tunnel, geophysical exploration, Dipole-Dipole

1. 서론

사면 안정화 공법 중 도로변의 환경에 부합하여 친환경적인 공법인 표면 보호공으로 식생토 공법을 적용하는 경우가 많다. 반면, 사면붕괴가 발생한 경우, 기초자료의 부재로 인한 붕괴원인 규명 및 대책 공법선정에 어려움이 뒤따른다. 본 연구에서는 현재 운용중인 국도변의 사면 붕괴 현장을 대상으로 현장조사에서 안정성 해석, 대책안 제시 과정을 실례를 들어 설명하였다. 본 현장의 경우, 사면 표면에 식생공이 시공되어 붕괴 원인 분석 및 대책안 제시에 한계성을 가지고 있으므로 안정성 해석 및 대책안 제시를 위하여 물리탐사를 이용하여 사면의 내부 상황을 분석하였다. 물리탐사는 비저항치 분포 원리에 근거한 쌍극자(Dipole-Dipole) 방식을 이용하였으며, 현장조사와 병행하여 지반강도정수를 도출하고 안정성 해석을 실시하였다. 붕괴 현장은 풀치 터널 갱구부 사면과 입구 사면으로 구분하였으며, 안정성 해석은 Talren97과 PC-Stabl5m을 이용하여 안전을 산정 및 대책방안에 대한 검토를 병행하여 실시하였다. 터널 갱구부 사면 붕괴는 절토사면과는 달리 시공성 및 대책공법 선정에 한계성을 가지고 있다. 풀치 터널 갱구부 사면의 경우 대책공법으로는 어스앵커를 제시하였으며, 터널 입구사면의 경우는 록앵커를 시공하는 것으로 제안하였다.

2. 지질 개요

조사대상 지역의 지질은 주로 변성암과 퇴적암으로 구성되며, 이에 용암, 심성암 및 암맥이 분출 또는 관입한다(최유구, 윤형대, 1968, 장흥지질도폭 설명서). 변성암의 대부분은 편마암류이며 화강암질편마암류, 반성변정편마암, 혼성편마암으로 대별된다. 퇴적암은 주로 화산기원의 퇴적물로 이루어진 응회암류이며, 이 외에 흑색사암, 셰일, 규암 등이 나타난다. 용암은 주로 안산암질이며 용결구조가 관찰된다. 상기 제층을 화강암류가 관입하였으며, 화강암류는 복운모화강암과 미문상화강암으로 대별된다.

조사대상 절개면 일대에서 관찰되는 화강암은 복운모 화강암으로써, 편마암 및 응회암층을 관입하고 있어 백악기 말 화산활동시의 관입암체로 추정된다. 주요구성광물은 석영, 장석, 흑운모, 백운모 등이며, 부구성광물로는 저어콘, 자철석 등이 관찰된다. 운모류는 판상구조를 가지고 있으므로 미끄러짐에 취약한 특징을 가지고 있어 사면 안정성에 나쁜 영향을 미칠 가능성이 높다.

표 1. 조사지역 일대의 지질계통표

제 4 기	~~~~ 부 정 합 ~~~~
백 악 기	암맥류 ----- 관 입 ----- 미문상화강암 복운모화강암 ----- 관 입 ----- 무등산용암 장평응회암 대조리유문암 부용산분출암류 다도응회암 유치역암 인곡응회암 ~~~~ 부 정 합 ~~~~
	천운산층 명봉층 ~~~~ 부 정 합 ~~~~
고생대말	설옥리층 용암산층 ----- 관계불명 ----- 혼성편마암 및 편암 반성변정편마암 우백화강암질편마암 메타텍틱편마암 화강암질편마암 : 조사지역 사면의 지층
시대미상	

3. 현장 개요

본 현장은 행정구역상 전라남도 강진군 성전면 월남리에 위치하고 있으며, 국도 13호선 선형 개량 사업의 일환으로 1997년 준공되었다. 본 붕괴 현장은 광주국도유지건설사무소 관내 풀치터널 갱구사면(이하 P-1지구)과 입구 사면(이하 P-2지구)에 해당되며, 국도 13호선 목포에서 영암방향의 왕복 4차로 구간 중 영암방향에 해당된다. 본 사면은 시공 중에도 수 차례 붕괴가 발생하여 사면 안정화 대책이 변경된 현장이다. P-1과 P-2지구의 규모와 붕괴 현황은 표 2와 같으며, 사면 현황은 그림 1과 2와 같다.

P-1지구 사면은 총 연장 70 m, 최대 높이 25 m, 경사 48°로 3개의 소단이 형성되어 있으며, 터널 갱구부의 좌측면(터널 갱구부를 정면에서 바라보았을 때)과 상부에 걸쳐 분포한다. 절개면의 상부는 국도 13호선의 구도로가 위치하며, 이곳으로부터 우기시 지표수의 유입이 빈번히 발생되고 있는 상황이다. 50~56 m 구간의 2 소단과 3 소단 사이에서 원호파괴가 발생되었으며, 현장조사시 3 소단내 인장균열의

발생을 확인할 수 있어 추가붕괴의 가능성이 존재한다.

P-2지구 사면의 총 연장은 384 m, 최대 높이는 49 m이나 시점부에서 170 m까지는 최대 25 m의 높이이다. 사면내에는 총 5개 내지 6개의 소단으로 형성되어 있으며 특히, 1 소단의 경우는 160 m지점 상부에서 유입되는 지표수의 배출을 위한 배수시설이 설치되어 있다. 80 m지점까지는 사면이 안정화되어 있으며 식생공이 잘 시공되어 있다. 80 m 하부에는 폭이 약 5.0 m, 깊이 1.0 m 정도의 규모로 사면의 하부가 이탈되어 있는 양상이 나타난다. 이런 사면 하부의 이탈된 상태는 일부 구간에서 나타난다. 사면 260 m 상부 부분에는 인장균열이 발달하고 있으며, 연장성 및 깊이는 현장 여건상 추정하기 어려운 상태이다. 인장균열의 폭은 약 15 cm 정도이며 육안 관측된 부분만 70 cm 내외의 연장을 갖는다. 인장균열은 연장선상에 2 개소에서 관측이 되며, 총 연장은 5 m 정도로 추정이 된다. 이는 절개면 시공시 전면부 응력 이완으로 발생된 것으로 추정된다. 붕괴부에 발달하는 절리의 방향은 160/47과 270/60, 330/60으로 평면파괴가 발생할 가능성이 있는 불안정한 상태이다(그림 6 참조). 특히, 붕괴부 우측부분의 경우 식생토 객토와 절개면 암반과의 밀착상태가 불량하여 객토가 암반으로부터 떨어져 있어 추가 붕괴의 가능성이 있다.

표 2. P-1 및 P-2 사면현황

구분	수직고(ΔH:m)	경사(°)	방향(°)	붕괴영역(m)	붕괴정도	붕괴양상	붕괴량(m³)	기존방호시설
P-1	25	48	126	6	C.W.~R.S.	원호파괴	50	식생공
P-2	59	50	300	20	M.W.~H.W.	평면파괴	650	L형측구, 식생공

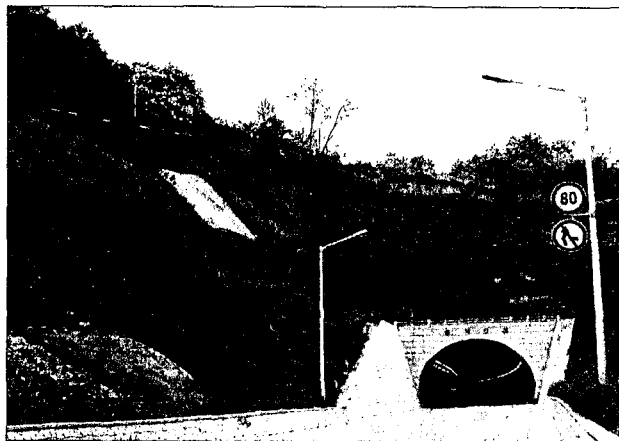


그림 1. P-1지구 전경사진

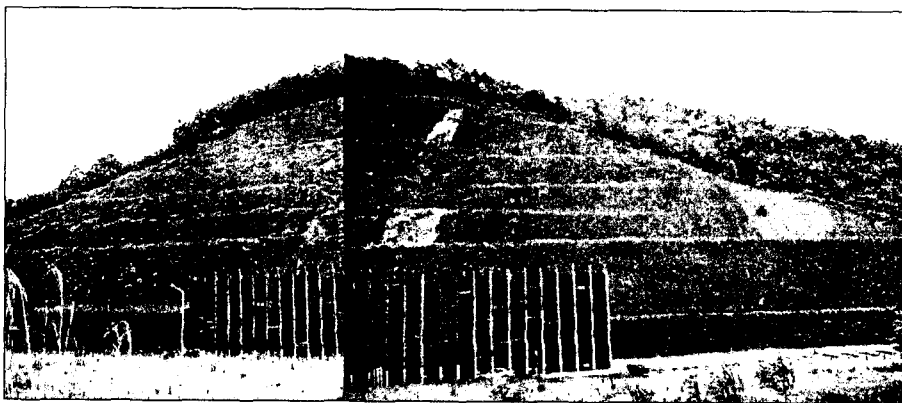


그림 2. P-2지구 전경사진

4. 조사방법, 안정성 해석 및 대책안 제시

4.1 현장조사 및 물리탐사방법

붕괴 현장에 대한 불연속면의 조사 및 붕괴 규모 파악이 수행되었으나, 일부 범면의 경우, 식생이 매우 발달하여 육안조사 자료의 보충을 위하여 물리탐사를 통한 절개면 내부의 상태를 확인하였다. 탐사방법으로 비저항 전기탐사방식인 쌍극자(Dipole-Dipole) 방식을 채택하였으며 정밀탐사를 위하여 5 m 간격으로 송수전점(Pole)을 설치하였다. P-1과 P-2지구 사면의 탐사결과는 그림 3과 4와 같다. 탐사결과를 분석해보면 P-1지구의 경우, 붕괴부는 35에서 55 m 구간에 해당이 되며, 지표면이 포화되어 있는 것으로 나타났다. 붕괴구간은 지속적인 지표수의 유입으로 인하여 토층의 세굴현상이 발생한 것으로 추정할 수 있다. P-2지구의 경우, 붕괴 구간은 약 102~107 m 구간에 해당이 되며, 100~127 m까지 지표면이 포화되어 나타나는 것으로 나타났다. 102~107 m 구간의 심도 약 4 m 하부가 포화되어 있으며, 심도 약 6 m 하부는 지하수의 유동가능성이 높은 것으로 나타났다.

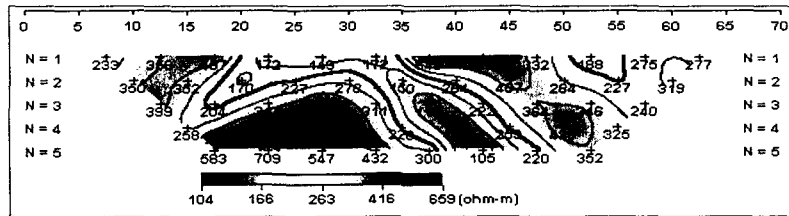


그림 3. P-1지구 물리탐사 결과

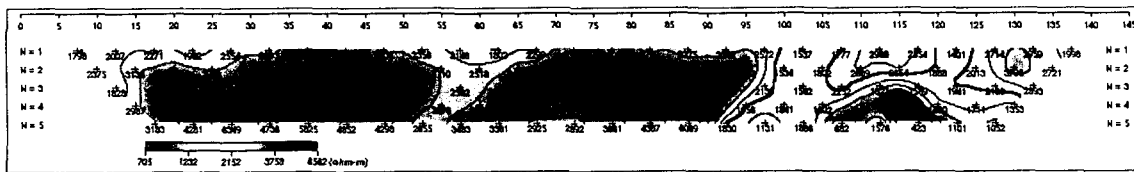


그림 4. P-2지구 물리탐사 결과

4.2 강도정수 결정

한계평형 해석에서 필요한 입력변수인 지반의 점착력과 내부마찰각은 많은 연구가 수행되고 있다. 그러나, 현장에 부합되는 정확한 물성치를 구하기 위하여 본 연구에서는 현장조사 보고서(건설교통부, 1998)와 역해석을 통하여 상호 비교분석하고 현 붕괴 형상과 관련 자료를 토대로 지반 강도정수값을 산정하였다. 풀치 터널의 경우 한계평형 해석에서 사용된 강도정수는 표 3과 같다.

표 3. 사면 안정성 해석에 사용된 강도정수값

	항 목	관련자료	현장 실험	역해석	적용값	비고
P-1지구	단위 중량	1.9	-	-	1.9	
	점착력(t/m ²)	-	-	1.065	1.065	
	내부마찰각(°)	-	-	22	22	
P-2지구	단위 중량	1.9	-	-	1.9	
	점착력(t/m ²)	2.3	25.8	2.5	2.0	
	내부마찰각(°)	32	30	30	30	

4.3 안정성 해석 및 대책안 제시

사면 안정성 해석은 토사사면 및 암반사면으로 구분하여 해석한다. 본 연구에서는 P-1지구의 경우, 토사사면의 안정성 해석을 수행하는 PC-Stab5m을 이용하여 역해석과 건조시, 포화시 해석을 수행하였다. 해석 결과, P-1지구는 기존의 붕괴부 주변으로 발달하는 인장균열을 따라 추가 붕괴의 가능성이 높음을 알 수 있었다. 따라서, P-1지구의 경우, 추가적인 범면유실을 방지하기 위해 어스앵커 설치를 제안하였다. P-2지구의 경우는 현장에서 수집한 불연속면의 자료를 토대로 Dips 5.0을 이용한 평사투영해석을 실시하였다. 또한 Talren97을 이용한 한계평형해석을 실시하여 붕괴 후와 보강 후의 안전율을 산정하였다. 본 논문에서는 대표적으로 풀치터널의 해석결과를 우기와 보강후로 구분하여 게재하였다.

P-2지구의 경우, 평사투영해석 결과 불안정한 상태를 보여주고 있다(그림 6). 또한, 한계평형해석상에서도 기준 안전율에 미치지 못하는 상태를 보이고 있다. 현장의 비저항 탐사결과 연약대층이 존재하는 것으로 밝혀졌으므로 연약대층과 붕괴발생 가능영역에 어스앵커(열심자형 수압관 포함)를 시공(시공구간 : 250~300 m, 높이 20~50 m, 2.5 m × 2.5 m 간격)할 것을 제안한다. 보강 후 한계평형해석상의 안전율이 2.7로 나타났다.

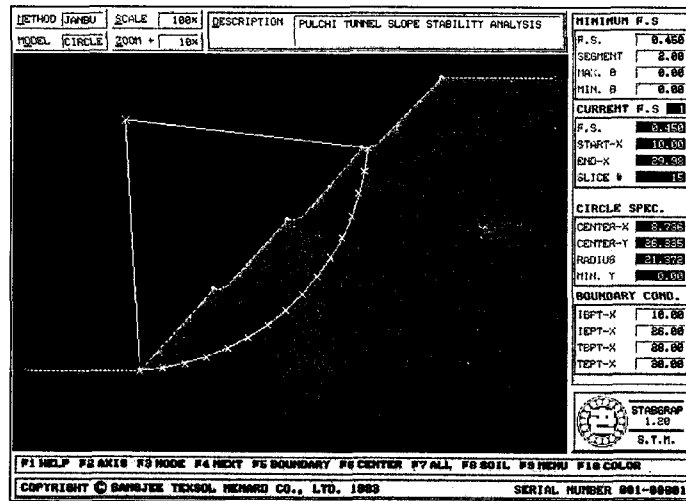


그림 5. P-1지구 포화시 안정성 해석

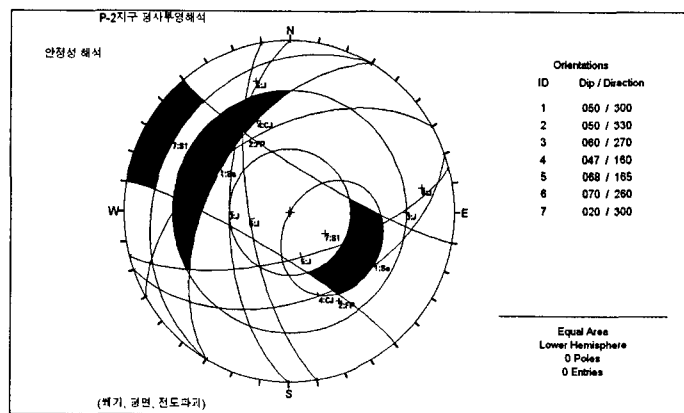


그림 6. P-2지구 평사투영해석

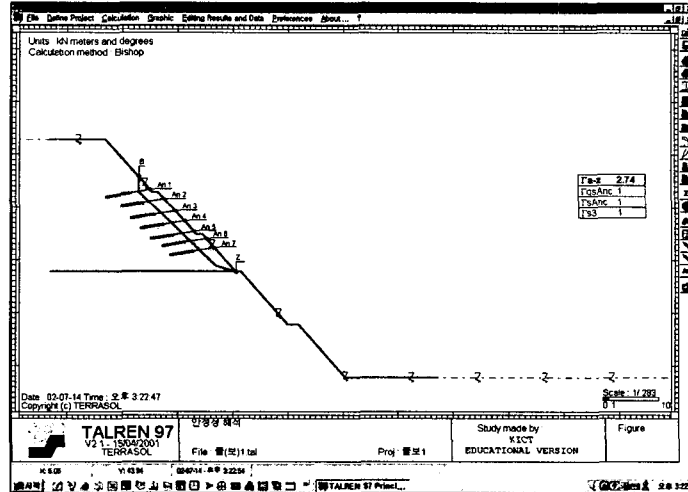


그림 7. P-2지구 안정성해석(보강후)

5. 결론 및 토의

친환경적인 대책공법의 선정으로 인하여 최근 절취후 사면에 식생공의 시공이 급속히 증대되었다. 본 연구의 경우, 식생공 시공으로 인하여 현장조사시 사면의 취약부분에 대한 검토의 방법으로 물리탐사를 통한 방법을 시도하였다. 현장조사와 물리탐사를 통하여 지반정수를 산정하고 안정성 해석을 실시하였다. 해석결과, 본 사면은 불안정한 상태이므로 효율적인 대책공법을 제시하였다. P-1지구의 경우, 법면 유실 및 추가 붕괴를 억제하기 위하여 심박기공을 시공하는 방안을 제안하였으며, P-2지구의 경우, 격자형 앵커에 의한 안정화 방안을 제시하였다. 지금까지 계획단계 및 시공중인 상태에서 탐사가 활발히 활용되었지만 운용중인 도로 붕괴 현장에 물리탐사는 적은 활용도를 보이고 있다. 향후 물리탐사 기법의 개발 및 운용기법 개발에 대한 연구가 지속적으로 추진되어야 할 것으로 본다.

감사의 글

현장 물리탐사를 위하여 장비 및 협력을 아끼시지 않으신 농업기반공사 서울지사와 광주지사 탐사팀에 대한 감사의 뜻을 전합니다.

참고 문헌

1. 건설교통부 익산지방국토관리청(1998), 성전-영암간 국도 확포장 공사 종합보고서, 건설교통부.
2. 김정호(2001), 터널 갱구부의 사면 보강 설계, 2001 사면안정학술발표회/사면안정조사 및 대책, 한국지반공학회, pp. 135~149.
3. 최유구, 윤형대(1968), 장흥지질도폭설명서, 국립지질조사소
4. Bieniawski(1989), *Engineering rock mass classification*, John Wiley & Sons, Inc., N.Y..
5. Hoek, E. & Bray, J. (1981), *Rock Slope Engineering*, Revised Third Edition, Institute of Mining and Metallurgy, London.